

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

**ALTEERRA**  
Wageningen Universiteit & Research centre  
Omgevingswetenschappen  
Centrum Water & Klimaat  
*Team Integraal Waterbeheer*

EEN ONDERZOEK NAAR DE GROOTTE VAN INFILTRATIE VANUIT  
WATERVOERENDE LEIDINGEN IN HET WATERSCHAP SALLAND

ing. H. Fonck

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties. Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten. Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

## I N H O U D

	Blz.
INLEIDING	1
GRONDSLAG VAN HET ONDERZOEK	1
WERKWIJZE	2
GRONDSLAGEN VAN DE BEREKENING	5
DE BEREKENING	8
INFILTRATIE	12
RESULTATEN	14
CONCLUSIE	18
WAT NOG TE DOEN STAAT	21

## INLEIDING

Zowel in de herfst van 1971 als in de zomer en herfst van 1972 zijn metingen verricht die ten doel hadden een inzicht te verkrijgen in de mate van infiltratie vanuit watervoerende leidingen in het waterschap Salland.

Het onderzoek in 1971 is verricht op een 20-tal plaatsen verspreid over het gehele waterschap. Daar staat evenwel tegenover, dat op elke meetplek de metingen slechts op één dag in duplo zijn verricht. Bijbehorende grondwaterstandsmetingen in dwarsraaien zijn dan ook gedaan in op dezelfde dag geboorde gaten. De resultaten zijn verwerkt in nota 710.

In 1972 is het onderzoek herhaald voor een twaalfstal objecten, die weliswaar minder regelmatig verspreid lagen over het waterschaps-areaal dan in 1971 doch als gevolg van een wat nauwkeuriger voorbereide keuze gelegenheid boden tot het verzamelen van meer gedetailleerd waarnemingsmateriaal. De metingen waren deze keer dan ook niet éénmalig, doch zijn in dezelfde uitgezochte leidingpunten meestal drie keer herhaald onder verschillende hydrologische of klimatologische omstandigheden.

## GRONDSLAG VAN HET ONDERZOEK

Bij de keuze van de te onderzoeken leidingpanden is ervan uitgegaan, dat getracht moest worden, metingen te verrichten bij uiteenlopende infiltratie-intensiteiten. Aangezien in 1971 was gebleken dat, zeker in een droge periode, grondwaterstandsverlaging vrijwel steeds gepaard gaat met slootpeilsverlaging, zodat de infiltratie-intensiteit zich niet zo sterk wijzigt als voor het onderzoek wel

wenselijk zou zijn, zijn in 1972 vooral leidingen met een inlaatmogelijkheid in het onderzoek betrokken, waarbij verwacht mocht worden, dat bij voortdurende droogte het leidingpeil niet in dezelfde mate als het grondwaterpeil zou zakken en zich daardoor verschillende infiltratie-intensiteiten ter bestudering zouden voordoen. Deze verwachting is in het algemeen uitgekomen hoewel niet in alle leidingpunten in dezelfde mate.

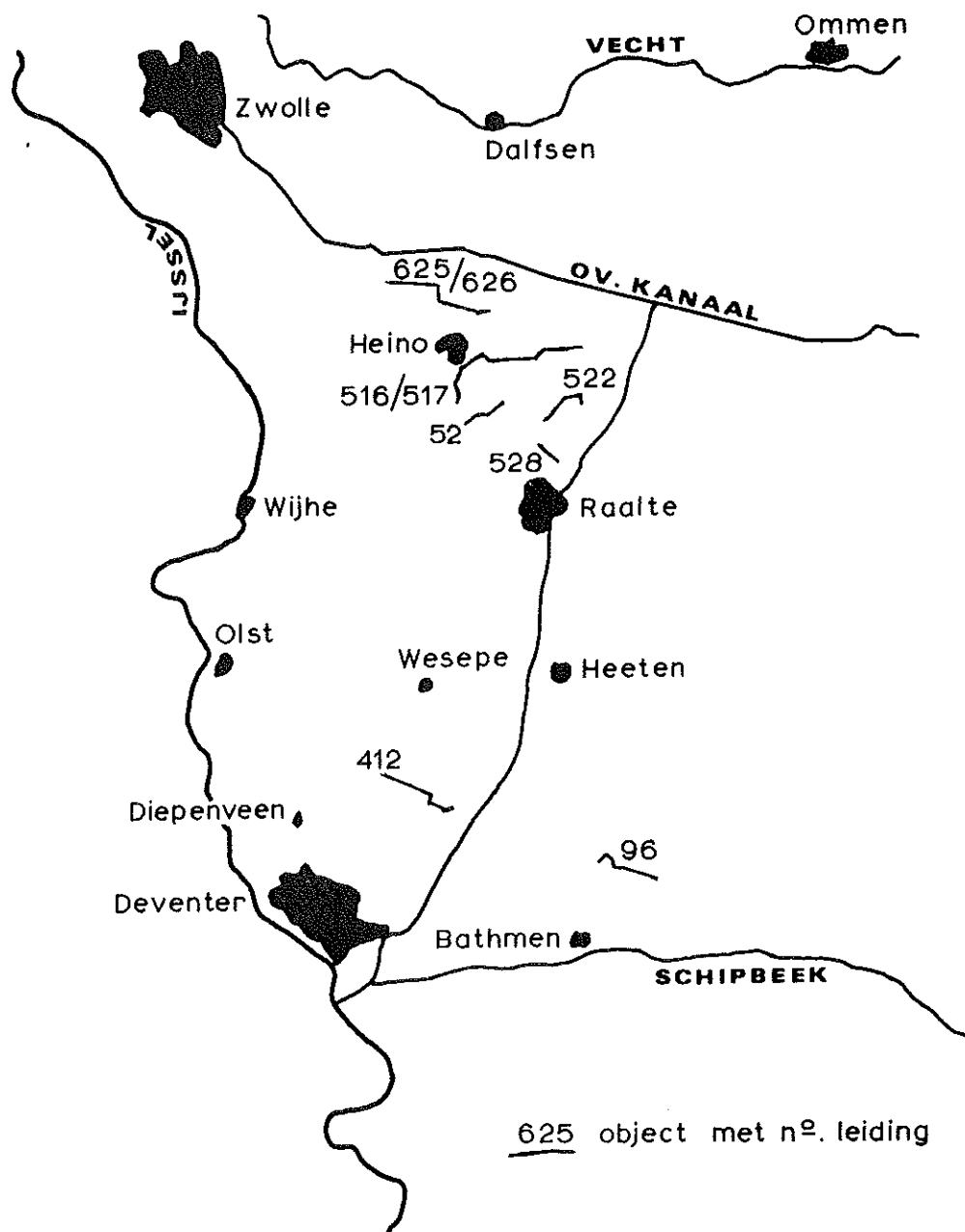
In het volgende overzichtje zijn aangegeven welke leidingpanden in het onderzoek zijn betrokken benevens de data, waarop kwel- respectievelijk infiltratiemetingen zijn verricht.

Leiding nr	Pand	Meetdatum		
516 - 517	stuw 3 → 4	29 juni	12 sept.	27 okt.
	stuw 4 → 5	27 juni	5 sept.	11 okt.
	stuw 5 → 6	10 aug.	14 sept.	6 okt.
	stuw 6 → 7	11 aug.	15 sept.	31 okt.
52	stuw 1 → 2	17 aug.	29 sept.	18 okt.
528	stuw 1 → 2	16 aug.	28 sept.	13 okt.
522	stuw 1 → 2	31 aug.	27 sept.	17 okt.
412	stuw 1 → 2	18 aug.	20 sept.	19 okt.
	stuw 2 → 3	23 aug.	22 sept.	20 okt.
	stuw 3 → 4	24 aug.	26 sept.	1 nov.
625 - 626	stuw 1 → 2	6 sept.		
	stuw 2 → 3	25 aug.	12 okt.	

#### WERKWIJZE

Als een object van onderzoek is steeds beschouwd een leidingpand, begrensd door twee stuwen. In een dergelijk leidingpand is steeds op een plaats, 50-100 m boven de lager gelegen stuw, met behulp van kwel-meters de infiltratie-intensiteit bepaald. Deze plek is gekozen, omdat, zelfs in tijden van veel neerslag, dicht boven deze stroomafwaarts gelegen stuw toch nog enige infiltratie is te verwachten. De procedure week enigszins af van die, welke in 1971 is gevolgd. Ten-einde het verstoren van het organische sliblaagje op de bodem van de sloot waarvan juist de grootste weerstand was te verwachten, zoveel mogelijk te vermijden, is gebruik gemaakt van een mobiele steiger, die vanaf het talud werd neergelaten en waarvan af de kwel-meters in een vast patroon rondom de steiger werden geplaatst. Bovendien werd

# OVERZICHTSKAARTJE



0 2 4 6 8 10 km

elke meting nu in zesvoud, in zes kwelometers rondom de steiger, verricht. De spreiding in meetresultaten is, als gevolg van deze werkwijze, duidelijk sterk afgenomen en leidt tot de conclusie, dat de resterende spreiding met een veel grotere waarschijnlijkheid de werkelijke variabiliteit in de bodemdoorlatendheid weergeeft.

Deze infiltratiemetingen zijn in elk pand driemaal verricht en wel in juni-augustus, in september en in oktober. De herhalingen zijn niet op precies dezelfde plaats verricht, doch ongeveer 10 meter stroomop- of stroomafwaarts.

Loodrecht op de gemiddelde plaats van deze infiltratiebepalingen is een dwarsraai van grondwaterstandsbuizen geplaatst, uit de waarnemingen waarvan een inzicht zou kunnen worden verkregen in het beeld van de afstroming uit de leiding in het aangrenzende land en de grootte van het optredende potentiaalverschil. Deze buizen waren ter weerszijden van de leiding geplaatst op steeds dezelfde afstanden van de leiding, namelijk op respectievelijk 100 m, 20 m, + 5 m en + 2 m van het hart van de leiding. Bij de dichtst bijzijnde buizen is + geplaatst, omdat deze afstand in sterkere mate afhankelijk is van de leidingbreedte, dan bij de verder af geplaatste buizen. De dichtst bijzijnde buis is steeds midden in het werkpand geplaatst, hetgeen overeenkomt met een afstand van een halve meter vanaf de in-steek van het talud.

Bovendien zijn over de gehele lengte van het leidingpand grondwaterstandsbuizen geplaatst in het werkpand, waarvan de onderlinge afstand kon variëren van 100-200 meter. De bedoeling hiervan is geweest aan de hand van getekende lengteprofielen het punt te bepalen, waar de grondwaterstandslijn het leidingpeil snijdt, met andere woorden het punt, waar drainage overgaat in infiltratie, teneinde hieruit conclusies te kunnen trekken aangaande het totale infiltratie- of drainage-overschot uit de gehele leidingpand.

Uiteraard zijn alle geplaatste grondwaterstandsbuizen gewaterpast. Tenslotte zijn ook steeds debietmetingen op de stuwen verricht.

Resumerend kon dus voor de berekening worden beschikt over:

1. Infiltratie-intensiteitsmetingen afkomstig uit kwelometers
2. Grondwaterstandswaarnemingen, die een beeld gaven van het hydrologische dwars- en lengteprofiel
3. Debietmetingen bij beide stuwen, die het leidingpand begrenzen

## GRONDSLAGEN VAN DE BEREKENING

Voor de berekening van de verschillende doorlatendheden is gebruik gemaakt van de formules voor de radiale weerstand zoals die door Ernst voor het berekenen van grondwaterstromingen zijn ontwikkeld. Het lijkt zinvol na te gaan, hoe men in het onderhavige geval de grondwaterstromingen mag veronderstellen teneinde tot een verantwoorde keuze uit de beschikbare formules te geraken.

Op grond van het onderzoek in 1971 was het reeds duidelijk, dat de stroming van het infiltrerende water onderhevig is aan in hoofdzaak twee weerstanden:

1. De weerstand in het dunne organische sliblaagje op de bodem, waarvan de werkzame dikte, afhankelijk van de ouderdom van de leiding, op grond van visuele schatting, op  $\pm 10$  cm kan worden gesteld en waarvan de intensiteit kan wisselen naar plaats en misschien ook naar tijd.
2. De doorlatendheid van het ongestoorde bodemprofiel waarin de leiding is gegraven. In het kader van dit onderzoek zijn geen speciale doorlatendheidsmetingen in dit profiel verricht. Wel is door de grote aantallen gaten, die voor het plaatsen van grondwaterstandsbuizen zijn geboord, kunnen worden vastgesteld, dat dit profiel, althans binnen het stroomgebied van de in het onderzoek betrokken leidingen, een grote eenvormigheid bezit en géén storende leem- of veenlagen vertoont. Op een 25-tal plaatsen over het gehele waterschap zijn tweelingbuizen geplaatst, waarvan de langste steeds tot 5 meter diepte. Ook hier is binnen boordiepte slechts zeer incidenteel een lemige afzetting geconstateerd. Hieruit volgt, dat door dit gehele pakket steeds een vrijwel horizontale parallel stroming kan worden verondersteld, welke over een afstand  $x$  een weerstand  $x/kD$  ondervindt.

De opeenvolging van waarnemingsbuizen in het dwarsprofiel maakt het aantrekkelijk om de stroming te beschouwen in een aantal concentrische zones rondom de half-cirkelvormige gedachte leiding met de waarnemingsbuizen als zonegrenzen omdat dan op eenvoudige wijze steeds per zone het optredende potentiaalverschil kan worden vastgesteld. Er ontstaat dan een situatie als in fig. 1 geschetst.

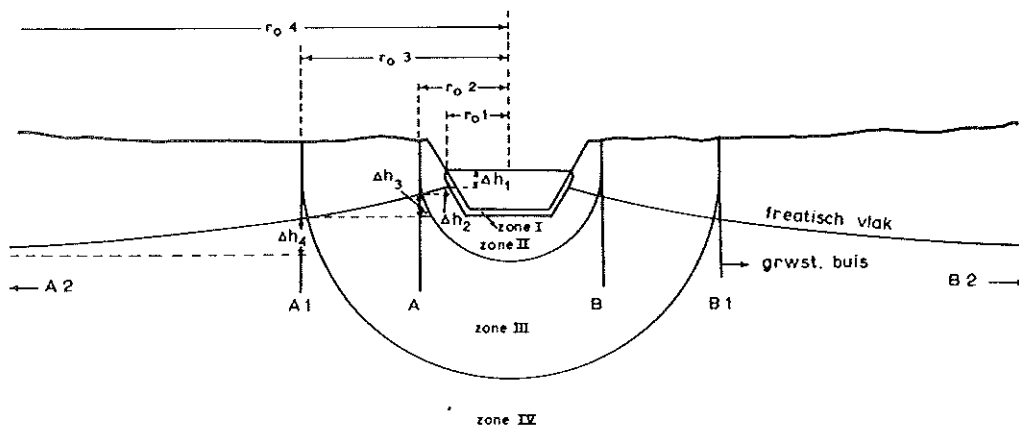


Fig. 1. Schematische voorstelling van het mechanisme van de infiltratie in het dwarsprofiel

Het verloop van het freatisch vlak op de grens van zone I en zone II is niet daadwerkelijk vastgesteld doch het resultaat van een logische conclusie op grond van de steeds weerkerende relatief grote potentiaalverschillen tussen leidingpeil en eerste grondwaterstands-buis. Een juist gereedgekomen proef om door middel van intensieve grondwaterstandsbepaling in het talud en werkpad tot een juist in-zicht in deze materie te komen is mislukt omdat juist op dat moment begonnen werd met een renovatie van talud en werkpad, waardoor de gehele opstelling verloren ging.

Bij een enkelvoudig homogeen pakket kan voor de radiale weerstand in het zandpakket in de zones II, III en groter de formule van het type:

$$W = \frac{1}{\pi k} \ln \frac{D}{\pi r_0} \quad (1)$$

worden gebruikt.

In gevallen, waarin de breedte van de leiding  $B_w$  veel groter zou zijn dan de waterdiepte van de leiding, zou deze formule overgaan in:

$$W = \frac{1}{\pi k} \ln \frac{4D}{\pi B_w} \quad (1A)$$



Dit doet zich echter bij de vier leidingpanden, die thans aan de orde zijn, niet voor. Weliswaar is het dwarsprofiel van de leidingen alleen bij benadering half rond. Men kan de juiste waarde voor de natte omtrek evenzeer benaderen door gebruik te maken van de formule voor p (natte omtrek) zoals die bijvoorbeeld ook in de formule van Manning gebezigd wordt:

$$P = b + 2y\sqrt{1 + p^2} \quad (2)$$

waarbij: b = bodembreedte

y = waterdiepte

p = taludhelling

Wil men rekening houden met de mogelijkheid dat het profiel niet geheel homogeen doorlatend is, doch dat er doorlatendheidsverschillen zijn, zonder dat er nu direct van een ondoorlatende laag sprake is binnen een diepte van 10 à 15 m, dan kan de juiste waarde van de radiale weerstand worden gevonden volgens:

$$K_1 W(r_o) = K_1 W^1(r_o^1) + \frac{1}{\pi} \ln \frac{r_o^1}{r_o} \quad (3)$$

Bij twee homogene horizontale lagen kan men voor de waarde van  $K_1 W^1(r_o^1)$  bij  $r_o^1/D_1 = \frac{1}{4}$  in afhankelijkheid van  $K_1/K_2$  en  $D_1/D_2$  vinden uit fig. 7 in Ernst mededeling 52, 1963.

In dit geval is er niet meer over de gelaagdheid van het profiel bekend dan dat de bovenlaag goed homogeen is met doorlatendheid  $K_1$  en dikte  $D_1$  en deze bovenlaag grotendeels de waarde van de radiale weerstand bepaalt. In verband hiermee kunnen de volgende formules worden opgesteld voor de zones, zoals die in fig. 1 schematisch zijn aangegeven.

$$\text{Zone I} \quad W_1 = \frac{D_1}{K_1 P} \quad (4)$$

$$\text{Zone II} \quad W_2 = \frac{1}{\pi k_2} \ln \frac{r_{o2}}{r_{o1}} \quad (5)$$

$$\text{Zone III} \quad W_3 = \frac{1}{\pi k_3} \ln \frac{r_{o3}}{r_{o2}} \quad (6)$$

enz.

Uit de metingen met de kwelmeters is de infiltratie-intensiteit I bekend. Door toepassing van:  $q = I \times P$  krijgt men de infiltratie-intensiteit over de gehele natte omtrek. Uit:

$$q = \frac{\Delta h}{W} \quad \text{of} \quad W = \frac{\Delta h}{q} = \frac{\Delta h}{I \times P}$$

kan per zone de radiale weerstand worden gevonden indien voor  $h$  steeds het potentiaalverschil per zone verkregen uit de grondwaterstandsverschillen tussen opeenvolgende grondwaterstandsbuizen, wordt ingevuld. Door substitutie van de aldus verkregen waarde voor de radiale weerstand  $W$  in (4), (5) en (6) kunnen de doorlatendheden in de verschillende zones worden berekend. In overeenstemming met de uitgangsveronderstelling moeten de berekende doorlatendheidswaarden voor de zones II, III en groter van dezelfde grootte-orde zijn.

#### DE BEREKENING

Aangezien de berekening van de doorlatendheid van de verschillende zones in alle onderzochte leidingpanden op volkomen identieke wijze heeft plaatsgevonden, lijkt het voldoende als voorbeeld de volledige verantwoording van de berekening van de doorlatendheden in de verschillende zones van een leiding weer te geven. Hiervoor is genomen leiding 516-517 en de berekening kan op de voet worden gevolgd in de tabellen I en II.

Tabel I

	29 juni	12 sept.	17 okt.	27 juni	5 sept.	11 okt.	10 aug.	14 sept.	6 okt.	11 aug.	15 sept.	31 okt.
Infiltratie-intensiteit $q = y \cdot P$	0,099	0,362	0,821	0,073	0,173	0,176	0,598	0,338	0,444	2,769	1,636	0,923
	0,271	0,844	0,823	0,343	0,078	0,151	0,184	0,122	0,742	1,560	1,973	0,765
	0,305	0,481	0,663	0,547	0,156	0,081	0,573	0,390	0,683	2,082	1,800	0,671
	0,232	0,391	0,624	0,146	0,240	0,133	0,547	0,353	0,444	2,640	2,010	0,547
	0,499	0,664	0,561	0,323	0,202	0,116	0,206	0,385	0,934	1,590	2,130	0,567
	0,616	0,604	0,838	0,260	0,278	0,072	0,126	0,299	0,572	1,754	2,222	1,066
Gemiddeld	0,37	0,56	0,72	0,28	0,19	0,12	0,37	0,34	0,63	2,06	1,96	0,75
Bodemhoogte + NAP	2,96	2,96	2,96	2,40	2,40	2,40	2,07	2,07	2,07	1,25	1,25	1,25
Peilschaalaflezing + NAP	3,63	3,60	3,51	2,96	2,88	2,76	2,72	2,71	2,68	2,17	2,08	1,74
Waterdiepte in cm	67	64	55	56	48	36	65	64	61	92	83	49
Waterspiegelbreedte in m	3,-	2,90	2,55	2,55	2,20	2,-	4,10	4,05	3,65	5,80	5,65	4,05
$\pi R_0 l$	4,71	4,56	4,01	4,01	3,46	3,14	6,44	6,36	5,74	9,11	8,88	6,36
Natte omtrek $P=b+2y\sqrt{(1+p^2)}$	3,77	3,69	3,38	3,47	3,18	2,77	4,21	4,19	4,08	6,77	6,43	5,03
Potentiaalverschil $\Delta h_l$ in cm zone I gem. van L en R	32,8	41,0	48,4	13,4	19,4	19,4	23,7	39,0	43,9	10,6	16,6	7,8
$\Delta h_l \cdot P$	1,24	1,51	1,64	0,46	0,62	0,54	1,-	1,63	1,79	0,72	1,07	0,39
Radiale weerstand $W_l = \Delta h_l : q$ in dagen/m	0,89	0,73	0,67	0,48	1,02	1,62	0,64	1,15	0,70	0,05	0,08	0,10
Doorlatendheid in m/etm.		0,037			0,038			0,031			0,222	
Kl gem. als $D_l = 0,1$ m/etm.												
$D_l$ gem. als $K_l = 0,035$ m/etm.		9,7			11,-			12,1			1,6	
$D_l$ afz. als $K_l = 0,035$ m/etm.	11,7	9,4	8,0	5,8	11,4	15,8	9,5	16,8	9,9	1,2	1,9	1,8
Stuw	3			4			5			6		7
Leidingvak		I			II			III			IV	

Tabel II

	29 juni	12 sept.	17 okt.	27 juni	5 sept.	11 okt.	10 aug.	14 sept.	6 okt.	11 aug.	15 sept.	31 okt.	
Ro2	2,95	2,95	2,95	3,05	3,05	3,05	3,75	3,75	3,75	5,40	5,40	5,40	
Ro3	8,25	8,25	8,25	8,-	8,-	8,-	7,75	7,75	7,75	9,50	9,50	9,50	
Ro4	23,75	23,75	23,75	24,-	24,-	24,-	24,25	24,25	24,25	25,-	25,-	25,-	
Werkzame $\pi \cdot Ro$ :													
$\pi \cdot Ro2 = (-2 \times \Delta h1)$	8,60	8,45	8,30	9,30	9,20	9,20	11,30	11,-	10,90	16,75	16,65	16,80	
$\pi \cdot Ro3 = [-2 \times (\Delta h1 + \Delta h2)]$	25,20	25,05	24,90	24,80	24,70	24,70	23,85	23,50	23,40	29,60	29,45	29,65	
$\pi \cdot Ro4 = [-2 \times (\Delta h1 + \Delta h2 + \Delta h3)]$	73,85	73,80	73,55	75,05	74,90	74,90	75,60	75,30	75,90	78,25	78,10	78,30	
$q \cdot \ln [\pi Ro2: Ro1]$	0,303	0,465	0,648	0,277	0,201	0,144	0,366	0,330	0,617	1,875	1,862	0,908	
$q \cdot \ln [\pi Ro3: Ro2]$	0,400	0,610	0,792	0,274	0,188	0,119	0,278	0,258	0,479	1,742	1,117	0,428	
$q \cdot \ln [\pi Ro4: Ro3]$	0,400	0,605	0,778	0,311	0,211	0,133	0,429	0,394	0,743	1,998	1,921	0,728	
$\Delta h2$ (gem. van L en R) in cm	2,5	3,2	4,7	3,4	2,2	1,8	2,6	2,0	3,6	5,1	5,8	2,9	
$\Delta h3$ (gem. van L en R) in cm	2,8	4,8	6,3	2,7	2,0	1,3	1,7	1,7	2,2	3,9	4,0	1,4	
$\Delta h4$ (gem. van L en R) in cm	3,6	5,0	6,1	3,5	2,1	1,4	2,5	2,6	4,0	6,5	5,8	2,2	
Doorlatendheid in m/etm.													
K2	3,84	4,65	4,38	2,59	2,92	2,52	4,46	5,23	5,46	11,71	10,23	9,97	
K3	4,54	4,04	4,-	3,23	2,98	2,89	5,23	4,87	6,94	9,54	8,87	9,72	
K4	3,54	3,85	4,05	2,83	3,20	3,03	5,43	4,80	9,79	10,55	10,55	10,54	
Gemiddeld	3,97	4,18	4,14	2,88	3,03	2,81	5,04	4,97	6,10	10,35	9,88	10,08	
	4,10			2,91			5,37			10,10			
Stuw	3			4			5			6			7
Leidingvak	I			II			III			IV			

In tabel I zijn de meetresultaten bijeengebracht en is de daaruitvolgende berekening van de radiale weerstand en de doorlatendheid van het organische sliblaagje in zone I ingevoerd. We zien hierbij, dat de radiale weerstand naar tijd en naar plaats kan variëren, doch als geheel in het leidingvak stuw 6 - stuw 7 toch een aanzienlijk lagere waarde vertoont.

Uitgegaan was van de visueel vastgestelde veronderstelling dat  $D_1$  ongeveer 10 cm zou bedragen. Indien men deze veronderstelling toepast op de drie hoogste leidingvakken, blijkt inderdaad, dat de gemiddelde doorlatendheid slechts weinig variatie vertoont (0,037, 0,038 en 0,031 m/etm). Er blijft dan slechts een variatie naar tijd over, die heel goed het gevolg kan zijn van tijdelijke verstoring door reinigingswerkzaamheden. Indien men ervan uitgaat, dat de doorlatendheid van het organische sliblaagje onder dezelfde omstandigheden overal dezelfde waarde moet hebben, doch dat alleen de dikte kan variëren, dient men als gemiddelde doorlatendheid 0,035 m/etm aan te houden. De bijbehorende gemiddelde dikten van de eerste drie leidingvakken zijn in tabel I berekend. Voor het vierde leidingvak zou dan een werkzame dikte van het organisch sliblaagje van slechts 1,6 cm overblijven. Dit is niet zo verwonderlijk als het lijkt, omdat juist daar de situatie enigszins afwijkend is als gevolg van een doorsnijding van een hoge rug door de leiding.

Niet uitgesloten moet worden geacht dat juist als gevolg van deze afwijkende situatie de lagere uitkomst moet worden verklaard zowel door de grotere doorlatendheid van het organische sliblaagje dan 0,035 m/etm als door een geringere laagdikte van 10 cm.

De doorlatendheid van het bodemprofiel in de zone II wordt berekend met:

$$K_2 = \frac{1}{\pi W_2} \ln \frac{r_{o2}}{r_{o1}} \quad (5A)$$

en van de daar buiten liggende zones op identieke wijze. Door voor  $W_2$  de term  $\frac{\Delta h_2}{q}$  te substitueren ontstaat:

$$K_2 = \frac{q}{\pi \Delta h_2} \ln \frac{r_{o2}}{r_{o1}} \quad (7)$$

In tabel II is de berekening van de doorlatendheid in de zones II, III en IV uit fig. 1 weergegeven. De gemiddelde doorlatendheid van het doorstroomde profiel blijkt ruim 4 m/etm te bedragen met geringe variaties per leidingvak. Alleen het 4e leidingvak blijkt een hogere doorlatendheid van ongeveer 10 m/etm te vertonen evenals dat in zone I het geval was. Dit hangt waarschijnlijk wederom samen met de profielopbouw in de hoge zandrug.

#### INFILTRATIE

De gevonden waarden stellen ons in staat na te gaan hoe groot de hoeveelheden water zijn die in werkelijkheid per tijdseenheid door infiltratie-overschotten uit dergelijke leidingen verdwijnen. Daartoe worden ook de stuwdebieten in de beschouwing betrokken. Als:

$Q_1$  = het debiet van de bovenste stuw

$Q_2$  = het debiet van de benedenste stuw

$A_D$  = het oppervlak van het drainerend bodemprofiel in de lengte doorsnede

$A_I$  = het oppervlak van het geïnfiltreerde bodemprofiel in de lengte doorsnede

$W_D$  = de radiale weerstand in het drainerend deel

$W_I$  = de radiale weerstand in het geïnfiltreerde deel

dan geldt:

$$Q_1 + \frac{A_D}{W_D} = Q_2 + \frac{A_I}{W_I} \left( + YB_W \frac{dho}{dt} \right) \quad (8)$$

In fig. 2 is in één leidingvak  $A_I$  en  $A_D$  ter verduidelijking gearceerd aangegeven.

In deze gesloten waterbalans kan alleen onderloopsheid van de stuwen een onzekere factor vormen. Over de grootte daarvan is, althans als conclusie uit dit onderzoek, niets bekend. Allereerst kan worden nagegaan of formule (8) opgaat met andere woorden men kan de juistheid van de infiltratieberekeningen controleren door formule (8) toe te passen. In onderstaande tabel III is dit geschied:

Tabel III. Waterbalans

Leiding vak	Datum	$Q_1$	+	$\frac{A_D}{W_D}$	-	$Q_2$	-	$\frac{A_I}{W_I}$	=	0	
I	29/ 6	4329	+	0	-	4114	-	177	=	38	
	12/ 9	1253	+	0	-	955	-	286	=	12	
	27/10	648	+	0	-	257	-	397	=	- 6	
II	27/ 6	0	+	74	-	0	-	74	=	0	
	5/ 9	33	+	23	-	0	-	58	=	- 2	
	11/10	23	+	16	-	0	-	36	=	3	alles in $m^3/etm$
III	10/ 8	950	+	0	-	791	-	151	=	8	
	14/ 9	1875	+	0	-	1710	-	149	=	16	
	6/10	755	+	0	-	449	-	317	=	- 11	
IV	11/ 8	1546	+	580	-	0	-	2540	=	-414	
	15/ 9	1607	+	212	-	0	-	2575	=	756	
	31/10	0	+	490	-	0	-	960	=	420	

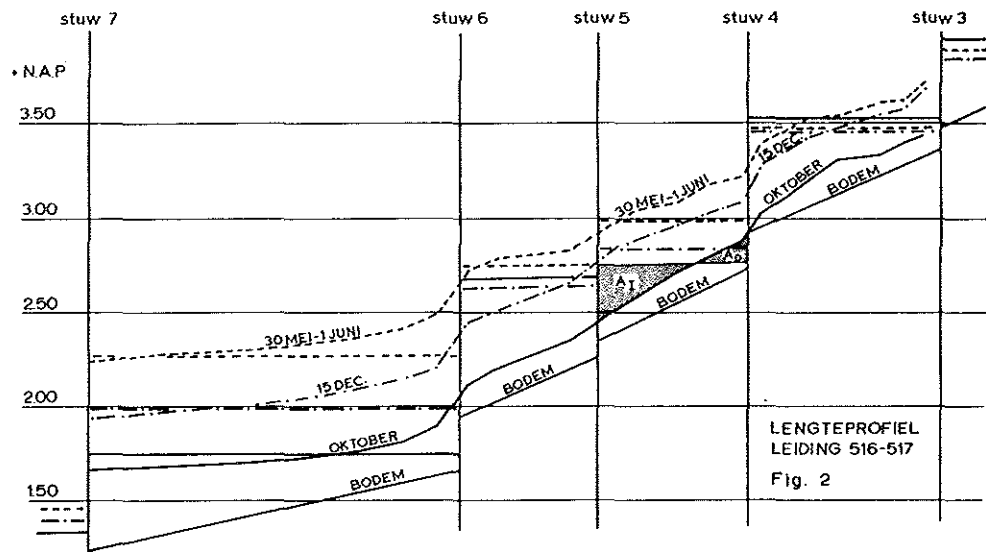


Fig. 2. Lengteprofiel leiding 516-517 met geschematiseerde voorstelling (gearceerd) van het deel van een leidingvak waar infiltratie plaats heeft ( $A_I$ ) en waar drainage plaats heeft ( $A_D$ )

Uit dit overzicht blijkt, dat voor de eerste drie leidingvakken de controle door middel van formule (8) goede resultaten geeft. De restwaarden zijn klein. In het vierde leidingvak voldoet de vergelijking niet meer, met als gevolg grote negatieve restwaarden. Dit wijst erop dat de infiltratie aanzienlijk groter is dan de aanvoer uit drainage en debied over de hoogste stuw. Juist in dit leidingvak daalt de waterspiegel dan ook sterk. Dit is in rekening te brengen met de toegevoegde term  $YB \frac{dh}{w dt}$  waarin de uitwerking van de waterspiegeldaling tot uitdrukking wordt gebracht.

Y = de lengte van het leidingvak

$B_w$  = waterspiegelbreedte

Aangezien de radiale weerstand W afhankelijk is van de natte omtrek P en D afneemt bij daling van het leidingpeil kan het zeer goed zijn dat de radiale weerstand in de bodem bij dalend leidingpeil steeds belangrijker wordt omdat het onder watertalud een steeds ondergeschikter rol gaat spelen. Als er, als gevolg van heterogeniteit van het profiel over het gehele leidingvak, bovendien een correctie op grond daarvan zou kunnen worden toegepast, zou wellicht de grote restwaarde daarmee verklaard kunnen zijn.

## RESULTATEN

In t a b e l IV zijn de resultaten van de berekening zoals die in de voorgaande bladzijden voor leiding 516-517 is uitgevoerd, voor alle in het onderzoek opgenomen leidingvakken bijeengebracht. Bij een beschouwing van deze resultaten vallen enkele dingen op.

Het eerste wat de lezer zal treffen is de grote eensluidendheid van de resultaten. De variatie in de berekende doorlatendheden zowel voor het organisch sliblaagje als voor de diepere ondergrond, is zeer gering. Hierop is onder andere één uitzondering en dat is het pand St 6 → St 7 van leiding 516-517 doch een mogelijke verklaring van deze afwijking is in de voorbeeldberekening van deze leiding reeds gegeven. Verder vertonen de leidingvakken 522 (op één datum) en 625 en 626 een iets hogere doorlatendheid.



Tabel IV. Samenvatting berekeningsresultaten

Leidingvak	in m D <sub>1</sub>	In m/etm				Gemiddelden		
		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub> t/m	K <sub>4</sub>
516-517								
St 3 → St 4	0,1	0,030	3,84	4,54	3,54			
I	0,1	0,037	4,65	4,04	3,85	0,037		4,10
	0,1	0,043	4,38	4,-	4,05			
St 4 → St 5	0,1	0,061	2,59	3,23	2,83			
II	0,1	0,031	2,92	2,98	3,20	0,038		2,91
	0,1	0,022	2,52	2,89	3,03			
St 5 → St 6	0,1	0,037	4,46	5,23	5,43			
III	0,1	0,021	5,23	4,87	4,80	0,031		5,37
	0,1	0,035	5,46	6,94	5,90			
St 6 → St 7	0,1	0,286	11,71	9,54	9,79			
IV	0,1	0,183	10,23	8,87	10,55	0,220		10,10
	0,1	0,192	9,97	9,72	10,54			
528								
	0,1	0,023	3,53	3,12	2,53			
	0,1	0,028	4,24	1,86	2,55	0,031		3,00
	0,1	0,034	3,40	2,74	3,06			
52								
	0,1	0,057	4,83	5,01	4,94			
	0,1	0,050	4,63	4,53	4,77	0,050		4,85
	0,1	0,043	4,55	5,80	4,58			
412								
St 1 → St 2	0,05	dr 0,039	4,50	4,20	3,70			
I	0,05	dr 0,028	2,60	3,40	4,00	0,033 dr		
	0,05	inf 0,044	3,10	4,00	4,70	0,044 inf		3,80
St 2 → St 3	0,05	0,057	4,80	4,80	5,00			
II	0,05	0,055	4,00	3,95	4,40	0,058		4,45
	0,05	0,062	4,70	4,13	4,30			
St 2 → St 3	0,05	0,027	2,83	3,17	2,23			
III	0,05	0,057	4,87	3,90	4,51	0,044		3,90
	0,05	0,047	4,33	5,25	4,04			
522								
	0,1	0,036	3,90	4,50	4,30			
	0,1	0,031	4,40	3,20	4,10	0,042		4,02
	0,1	0,060	4,00	3,70	4,10			
625								
	0,1	0,1	4,17	4,72	5,10			
	0,1	0,085	3,85	4,40	4,80	0,092		4,51
626								
	0,1	0,07	3,30	3,-	2,95	0,070		3,08

Een tweede bijzonderheid, die in het oog springt, is de geringere laagdikte van het organisch sliblaagje in de leiding 412. Dit berust op visuele waarneming. Leiding 412 is jonger dan leiding 516-517 en het is zeer wel mogelijk, dat zich in verband hiermee in eerstgenoemde leiding alleen nog maar een dunner laagje heeft kunnen ontwikkelen dan in laatstgenoemde leiding. Vastgesteld is in ieder geval kunnen worden, dat het organisch sliblaagje hierin relatief dunner is. Over de werkelijke werkdikte, dat wil zeggen de dikte waarin de aangetroffen geringe doorlatendheden werkelijk voorkomen kan pas definitief uitsluitel worden gegeven, als aanvullende doorlatendheidsmetingen verricht zijn in steekmonsters in en vlak onder dit sliblaagje.

In tabel V zijn de volledige resultaten verzameld van de berekening van de totale hoeveelheid water, die de onderzochte leidingpunten in- en uitstromen, zowel door de grond als over de stuwens volgens de waterbalans, die in formule 8 gestalte heeft gekregen.

Ook hier is een enkele kanttekening op zijn plaats.

Eveneens valt op het afwijkende gedrag van het leidingpand St 6 → St 7 van leiding 516-517, waarvoor een verklaring evenwel reeds is gegeven bij de desbetreffende voorbeeldberekening. Hetzelfde doet zich overigens nogmaals voor bij leidingvak 626.

In het algemeen mag worden gesteld dat de opgestelde waterbalansen redelijk kloppen. Alleen bij de leidingen 528 en 52 is een afwijking te constateren, die niet door toevoeging van de term  $YB \frac{dh}{w dt}$  verklaard kan worden omdat hier van waterspiegeldaling als gevolg van het stoppen van de aanvoer geen sprake is. De hoeveelheden water, die hier de balans verstoren zijn namelijk wel constant. Bij leiding 528 gaat bij elke meting steeds 0,0011 m<sup>3</sup>/sec méér water over de benedenste stuw dan berekend is en bij leiding 52 is dit 0,006 m<sup>3</sup>/sec.

De verklaring hiervoor kan zonder aanvullende bepalingen alleen nog maar vermoed worden. Een verklaring zou kunnen zijn, dat  $W_D$  niet dezelfde waarde heeft als  $W_I$ . Aangezien de werkelijk gemeten potentiaalverschillen steeds in het tracé van de leiding, waarin infiltratie optrad, waren gelegen, kan voor de waarde van de radiale weerstand in het deel, waar infiltratie optreedt, worden ingestaan. In het deel van de leiding, waarin drainage optrad is bij gebreke aan

Tabel V. Waterbalans in m<sup>3</sup>/etmaal

Leiding	Leidingvak	Q <sub>1</sub>	+	A <sub>P</sub> W <sub>D</sub>	-	Q <sub>2</sub>	-	A <sub>I</sub> W <sub>I</sub>	=	0
516-517	St 3 St 4 I	4329	+	0	-	4114	-	177	=	38
		1253	+	0	-	955	-	286	=	12
		648	+	0	-	257	-	397	=	- 6
	St 4 St 5 II	0	+	74	-	0	-	74	=	0
		33	+	23	-	0	-	58	=	- 2
		23	+	16	-	0	-	36	=	3
	St 5 St 6 III	950	+	0	-	791	-	151	=	8
		1875	+	0	-	1710	-	149	=	16
		755	+	0	-	449	-	317	=	- 11
	St 6 St 7 IV	1546	+	580	-	0	-	2540	=	-414
		1607	+	212	-	0	-	2575	=	-756
		0	+	490	-	0	-	960	=	-420
528		415	+	54	-	544	-	3	=	- 78
		683	+	34	-	795	-	13	=	- 91
		354	+	24	-	440	-	42	=	-104
52		2765	+	36	-	3231	-	151	=	-581
		2765	+	0	-	2765	-	449	=	-449
		2851	+	0	-	2851	-	504	=	-504
412	St 1 St 2 I	717	+	229	-	911	-	0	=	35
		795	+	146	-	994	-	0	=	- 53
		648	+	43	-	613	-	79	=	- 1
	St 2 St 3 II	475	+	235	-	795	-	0	=	- 85
		683	+	334	-	898	-	0	=	119
		544	+	165	-	544	-	196	=	- 31
	St 3 St 4 III	1486	+	121	-	1572	-	34	=	1
		1080	+	411	-	1356	-	156	=	- 21
		752	+	314	-	838	-	259	=	- 31
522		458	+	26	-	372	-	123	=	- 11
		734	+	25	-	683	-	72	=	+ 4
		162	+	56	-	0	-	221	=	- 3
625		0	+	368	-	225	-	133	=	+ 10
		0	+	199	-	29	-	169	=	+ 1
		0	+	153	-	0	-	92	=	+ 61

waarnemingen in dat deel dezelfde waarde voor de radiale weerstand aangenomen. Theoretisch is evenwel een andere waarde van de radiale weerstand in het deel waarin drainage constant of afwisselend optreedt verdedigbaar, omdat de waterstroming in omgekeerde richting als in het geïnfiltreerde deel het organisch sliblaagje passeert. Het is denkbaar dat een drainerende waterstroming de slibdeeltjes uit de poriën weert of loswoelt, terwijl een infiltrerende waterstroming door inspoeling juist de poriën verstopt, maar feitelijk vastgesteld is dit nog niet.

Een tweede oorzaak die de waterbalans kan verstoren, is lekkage langs de stuwen. Hiermede is niet bedoeld de onderloopsheid van de stuwen die door waarnemingen te achterhalen is zoals geschied is in de interne nota van de Koninklijke Nederlandse Heidemaatschappij: Hydrologisch onderzoek in het Haarlerveld (juni 1972). Visueel is wel vastgesteld dat sommige stuwen lekkage vertonen in het scheidingsvlak van de bodem en het betonlichaam. Men ziet dan duidelijk water uittreden in scheuren van de betonnenbeplating beneden de stuw. Dit kan ook onzichtbaar geschieden, als het proces zich geheel onder water voltrekt. Aangezien niet bekend is hoe belangrijk deze lekkage kan zijn, omdat de hoeveelheden niet door directe metingen zijn vast te stellen, moet dit verschijnsel wel bij de mogelijke oorzaken van de verstoring van de waterbalans worden gerekend. Bij een groter aantal waarnemingen kan waarschijnlijk juist deze constante afwijking als een maat voor dit soort lekkage worden gehanteerd.

## CONCLUSIE

Gesteld kan worden, dat de waarnemingen en de daaruit voortvloeiende berekening van de doorlatendheden en radiale weerstanden van de bodems van watervoerende leidingen geleid hebben tot resultaten die met geringe of redelijk verklaarbare variaties het volgende te zien geven:

1. Het organisch sliblaagje op de bodem van watervoerende leidingen heeft bij een visueel vastgestelde dikte van 5 à 10 cm een gemiddelde doorlatendheid van 0,04 m/etm.
2. De doorlatendheid van het ongestoorde profiel onder het onder 1 genoemde laagje is op grond van optredende potentiaalverschillen berekend en vastgesteld op 4,10 m/etm.
3. De doorlatendheid van het organische sliblaagje bedraagt dus steeds slechts een honderdste van de doorlatendheid van het ongestoorde profiel erbuiten en kan op grond van dit grote verschil dan ook zonder meer als storend worden aangemerkt als de leidingen voor infiltratiedoeleinden zouden moeten worden gebruikt.
4. De infiltratiemogelijkheden via de leidingen lijken op grond van de resultaten van dit onderzoek niet bijster groot, aangezien de gewenste infiltratiehoeveelheden bij de heersende slootwand doorlatendheden grote infiltratie-oppervlakken zullen gaan vergen.

Indien men globaal vast wil stellen hoeveel water op grond van de berekeningsresultaten nu eigenlijk door peilsverhoging tot infiltratie kan worden gebracht dient men uit te gaan van de formule:

$$K_1 = \frac{q \cdot D_1}{\Delta h_1 \cdot P} \text{ m/etm}$$

en wel in de gedaante, waarin  $q$  expliciet voorkomt, namelijk:

$$q = \frac{K_1 \cdot \Delta h_1 \cdot P}{D_1} \text{ m}^2/\text{etm}$$

Op grond van de berekeningsresultaten kan  $D_1$  constant op 0,1 m worden gesteld en  $K_1$  op 0,04 m/etm. Het effect van peilsverhoging komt dus tot uiting in een vergroting van de natte omtrek zowel als van het potentiaalverschil  $\Delta h_1$ . Indien wordt uitgegaan van een bestaand gemiddeld potentiaalverschil van 0,2 m in de gedeelten waarin reeds infiltratie voorkomt, kan gesteld worden op grond van de berekeningsresultaten dat van elke 10 cm peilsverhoging ongeveer 8 cm ter vergroting van het potentiaalverschil nodig is. De natte omtrek neemt bij elke 10 cm peilsverhoging met ongeveer 0,4 m toe. Op grond van

deze overwegingen kan het volgende overzichtje worden opgesteld voor drie typen leidingen, namelijk met een natte omtrek van 2, 5 en 8 m.

q bij toenemend peil: (in  $m^2/etm$ )

$\Delta h_1$	P	q	P	q	P	q
0,20	2,-	0,16	5,-	0,40	8,-	0,64
0,28	2,40	0,27	5,40	0,60	8,40	0,94
0,36	2,80	0,40	5,80	0,84	8,80	1,27
0,44	3,20	0,56	6,20	1,09	9,20	1,62
0,52	3,60	0,75	6,60	1,37	9,60	2,-
0,60	4,-	0,96	7,-	1,68	10,-	2,40

Als de leiding de enige plaats is, waar water tot indringing kan worden gebracht, hangt het van de leidingafstand L af voor welke oppervlakte deze infiltratie geldt. De verhouding tussen q en L geeft dan aan hoeveel water over de gehele oppervlakte tot indringing komt. Het volgende overzicht geeft daarvan een beeld.

Indringing in mm/etm bij drie verschillende typen leiding(grootte) met bijbehorende gemiddelde leidingafstand L: (in mm/etm):

bij $\Delta h_1$	P 2,- L 300	P 5,- L 750	P 8,- L 1500
0,2	0,53	0,53	0,45
0,28	0,90	0,80	0,63
0,36	1,33	1,12	0,85
0,44	1,87	1,45	1,08
0,52	2,50	1,83	1,33
0,60	3,20	2,24	1,60

Uit dit overzicht blijkt wel, dat de mogelijkheden tot opvoeren van de te infiltreren hoeveelheden water door peilverhoging niet erg groot zijn. Bij handhaving van het bestaande leidingstelsel blijken de kleine leidingen in dit opzicht iets effectiever dan de grote, hoewel het verschil niet groot is. De enige mogelijkheid tot effectieve infiltratievergroting lijkt te liggen in verkleining van L, dus door opvoeren van de leidingdichtheid.

## WAT NOG TE DOEN STAAT

Wanneer men zich tenslotte voor ogen wil stellen, wat nog te doen staat, dan valt het resterende probleem duidelijk twee delen uiteen:

1. Een verdieping van het inzicht in het proces van de infiltratie zelf hetgeen verkregen zou kunnen worden door enkele reeksen aanvullende metingen van verschillende aard.
2. Een beschouwing van wat de resultaten van het onderhavige onderzoek nu eigenlijk in de praktijk betekenen voor de infiltratiemogelijkheden in Salland. Mocht de conclusie van een dergelijke beschouwing negatief uitvallen, dan kan tevens de mogelijkheid van een doorlatendheidsverbetering aan de orde worden gesteld.

Ad 1. Hoewel de resultaten tot nu toe door hun grote eensluidendheid bevredigen konden, zijn er hier en daar nog wel punten, die om opheldering vragen.

1. Het lijkt zinvol na te gaan hoe dik in werkelijkheid de werkelijke dikte van het organisch sliblaagje op de bodem is. Dit kan heel goed geschieden door middel van steekmonsters. De berekende doorlatendheden kunnen dan aan directe meetresultaten getoetst worden.
2. In een geschikt leidingvak zou de gehele waterbeweging als één onverbrekkelijk geheel van begin tot eind onderzocht kunnen worden door tegelijkertijd doorlatendheidsmetingen met kwelmeters uit te voeren over het gehele leidingpand. Dus niet alleen in het infiltrerende deel, zoals nu is geschied, doch ook in het drainerende deel en eveneens op het punt, waar drainage in infiltratie overgaat en waar de metingen dus nul tot resultaat zouden moeten hebben. Deze drainage-c.q. infiltratiemetingen zouden vergezeld moeten gaan van bijbehorende potentiaalverschilbepalingen in evenveel dwarsraaien. Hiermede zou tevens kunnen worden vastgesteld of de doorlatendheid van het organisch sliblaagje in het gedraineerde deel inderdaad duidelijk verschilt van die in het geïnfiltreerde deel.

3. Een verfijning van het onderzoek zou kunnen zijn het vaststellen van eventuele doorlatendheidsverschillen tussen bodem en talud. De steeds voorkomende betuining zal hierbij wel een obstakel vormen.
4. Door zeer intensieve grondwaterstandsmetingen in het werkp pad van de leiding dient de juiste vorm van het freatisch vlak op de grens van zone I en zone II (zie fig. 1) nader worden vastgesteld. Een beter inzicht in de preciese vorm bij een groot potentiaalverschil kan het inzicht in de grootte van de radiale weerstand verdiepen.

Ad 2. Indien men ter gedachtenbepaling eens uitgaat van een gemiddelde onderlinge slootafstand van 80 m en een gemiddelde natte omtrek van 2 m dan moet om 1 mm water tot infiltratie te brengen de doorlatendheid van de slootwand 40 mm/etm bedragen. De ruimte voor infiltratie is dan gering. Maar juist de afwijkingen met een hogere doorlatendheid attenderen op een infiltratiemogelijkheid welke in sommige profielen wel aanwezig lijkt te zijn. Het zal van belang zijn op een veel groter aantal profielen de infiltratieweerstand te bepalen teneinde na te gaan of er voldoende oppervlakte met bruikbare doorlatendheid aanwezig is. Tevens zal dienen te worden nagegaan of een bruikbare doorlatendheid behouden blijft of in waarde met de tijd terugloopt. De infiltrerende werking is nu vaak gebaseerd op het verder conserverend tegenhouden van drainage op de leiding als gevolg van opzetten van het leidingpeil. Een aanvullende kartering en bemonstering met steekmonsters zal uitkomst moeten bieden over de vraag of er voldoende oppervlak slootwand met een bruikbare doorlatendheid aanwezig is. Hierbij kan tevens worden nagegaan, in hoeverre de doorlatendheid van de bodem afwijkt van die van het onder watertalud. Het is zeker niet ondenkbaar, dat als gevolg van het opzetten van het leidingpeil een aanzienlijke oppervlakte beter doorlatend talud aan de reeds bekende matig tot slecht doorlatende bodem kan worden toegevoegd.